

降雨による斜面崩壊発生時期の予知法 に関する現地実験

八木 則 男*・矢田部 龍 一*・榎 明 潔*

Field Experiment on Slope Failure due to Rainfall

Norio YAGI, Ryuichi YATABE and Meiketsu ENOKI

Summary: For the purpose of investigating the prediction methods of a slope failure due to a rainfall, the field experiment was carried out at the Komeno experimental forest of Ehime university.

The site of the experiment has long slope whose average angle is 42 degrees and there is very weathered granite soil of about 1.0m thickness on a base rock. The mechanical properties of this soil were tested for the analysis of the slope failure.

The three kinds of prediction method by a displacement of slope surface, by a shear strain in the ground and by pore pressure were examined. Three displacement gauge on the slope surface, three shear strain gauge and eight pore pressure gauge in the ground were set up.

The artificial rainfall which was spouted from the pipes with many holes set up on the slope surface, was given on the slope within a range of 25 m length and 10 m width. On the first day of the experiment, no slope failure occurred after three hours from the start of rainfall of intensity 20~30mm/hour. On the second day, a part of the slope of 15 m² has fallen after the three hours from the start of rainfall of the same intensity. Almost no displacement on the slope surface and no shear strain in the ground occurred until a few second before the failure. But pore pressures which generated gradually from the start of a rainfall, increased sharply before 15~20 minutes before the failure.

The seepage analysis using the finite element method and the stability analysis using Janbu method were conducted. The result of the analysis shows the minimum safety factor of 0.72 for this slope during seepage of a rain water. The reason that no failure over the whole range of a rainfall is considered to be due to existing of many roots of stumps.

1. ま え が き

降雨時の自然斜面や人工斜面の崩壊の予知に関しては数多くの研究がなされてきているが、未だ十分な成果をあげているとはいえない。崩壊の予知、予測法には①発生場所、②発生時期、それに③崩壊の規模の3つの項目が満たされている必要があろうが、¹⁾ここでは災害から人命を守るためもっとも重要な崩壊発生時期の予知の可能性について調べる。崩壊発生時期の予知法としては大別して2つの方法がある。ひとつは崩壊発生の前兆を斜面のなんらか

* 工学部海洋工学教室 Department of Ocean Engineering, Faculty of Engineering

の動きから検知しようとするものであり、もうひとつは崩壊発生を支配する主な誘因の変化から予測しようとするものである。前者では代表的なものとして地表面のひずみ速度の変化を用いる斎藤の方法²⁾がある。また、地表面の傾斜の変動³⁾、あるいはAEを用いる方法⁴⁾等も提案されている。後者では代表的なものとしては、崩壊発生危険雨量の設定が検討され実用化されてきている。これらの崩壊発生時期の予知法に関しては、その有効性を検討した事例もかなり報告されているが、反面多くの問題点も残されている。

斜面崩壊の確固たる発生時期の予知法が確立されていない理由のひとつとして、崩壊機構が多様であり、その支配要因が十分解明されていないことがあげられる。著者らは、降雨時の斜面崩壊機構の解明と斜面安定解析法の確立を目的として、不かく乱まき土の力学試験⁵⁾、室内斜面崩壊実験、降雨浸透解析、それに斜面安定解析を行ってきた^{6,7,8)}。そして、斜面先下部での過大な間隙水圧が斜面崩壊の主要因であることや、飽和・不飽和浸透解析により降雨時の斜面内間隙圧を精度良く追跡できること等を明らかにしている。そこで、本報告では斜面崩壊の主要因である間隙水圧に着目して、現地で降雨による斜面崩壊実験を行い、前兆現象による発生時刻の予知の可能性について検討した結果と開発した降雨時の斜面安定解析法を現地斜面実験について適用した結果について述べる。

2. 現場実験の概要

(1) 実験斜面

実験斜面は愛媛県松山市米野の愛媛大学農学部附属演習林内の山腹斜面の下端部である。植生は幼ヒノキと雑草で

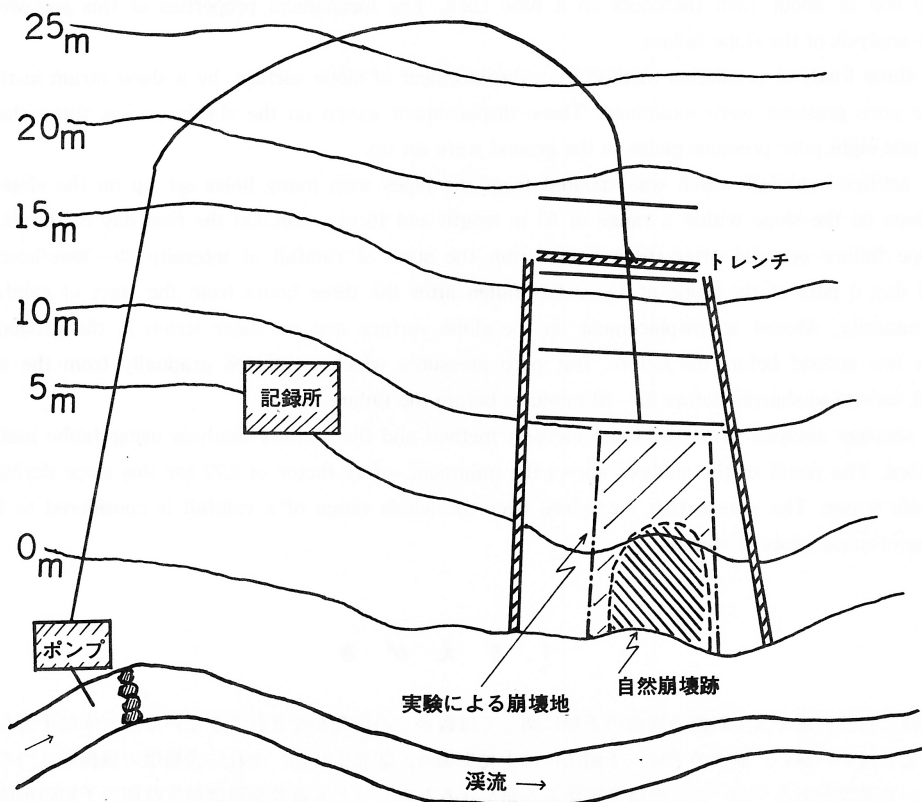


図-1(a) 実験地の平面図

ある。また、実験予定地内には直径50~60cmのスギと雑木の切株が6個あり、それらは伐採後2年経過しているだけで根はまだ朽ちていない。図-1に斜面の平面図と縦断面図を示す。斜面角度は平均42°で、全体が谷地形の一部である。実験対象地は図-1に併記したトレンチ内で、横幅が10m、縦25mである。地質は基岩が領家型花崗岩で表層土は緩いまさ土（腐植土を多く含む）である。表層土の層厚は平均1mである。基岩の花崗岩はかなり風化が進んでおり、多くのクラックを含んでいる。また、基岩と表層土の間には花崗岩が岩屑化した層が狭まれており、非常に透水性の良い層を形成している。図-1に示すように斜面右下には、過去に自然崩壊した跡が見られる。

(2) 土質調査

斜面の表層土の調査としては、弾性波探査、土研式簡易貫入試験、一般の物理試験（比重、粒度、単位体積重量）、三軸圧縮試験を行い、ならびに不飽和浸透解析に用いるサクションと含水比の関係を調べた。

弾性波探査の結果を図-2に示す。表層土と基岩の間に岩屑層がある関係で走時曲線は若干ばらついているが、これから表層土の層厚は約1.0mで伝播速度は表層土で300m/sec、基岩で1285m/secと求められる。

土研式簡易貫入試験結果を図-3に示す。これから、表層土は強度が小さく、また、深さ方向に強度はわりと一様であることがわかる。なお、図中深さ50cm程度で貫入不能になっているのは、木の根や土中の石に当たっているせいであり基岩に達しているからではない。簡易貫入試験機により表層土の厚さを調べる場合、土中の木の根等により貫入不能となり層厚の測定を誤ることがあるので注意を要する。

表層土の粒径加積曲線を図-4に示したが、砂分とれき分が大半である。また、比重 G_s は2.63で、単位体積重量 γ_d は1.46である。

まさ土の不かく乱状態での三軸試験はこれまで困難とされていた。それは、粒子同士の結合力が弱い三軸試験用の供試体の作成が困難であったからである。そこで、著者らが開発した不かく乱まさ土の供試体の作成法により試料の採取を試みた⁵⁾。すなわち、20cm角程度のブロックを表層土より切り出し、それを液体窒素で凍結させた後、コアビットで円柱状試料を採取しディスクカッターで端面を成形し ϕ 50mm、h 100mmの供試体を作成した。試験

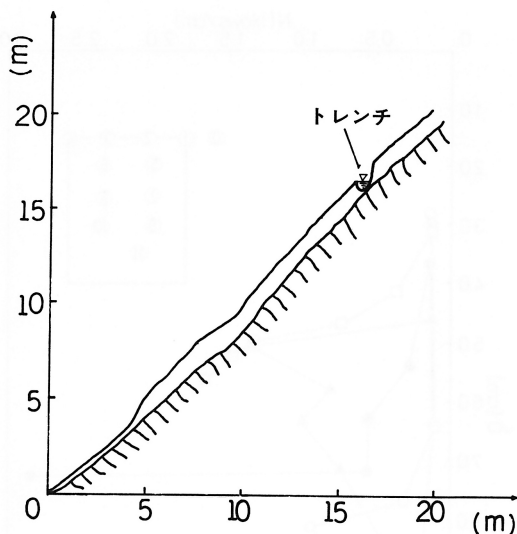


図-1 (b) 実験地の縦断面図

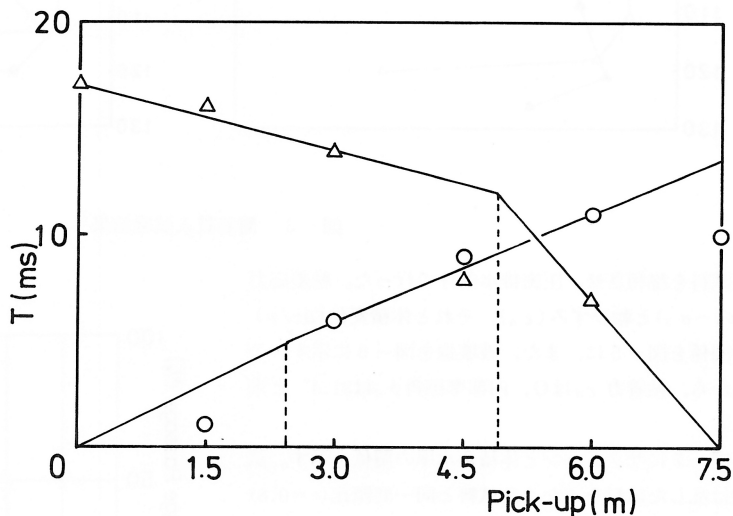


図-2 走時曲線

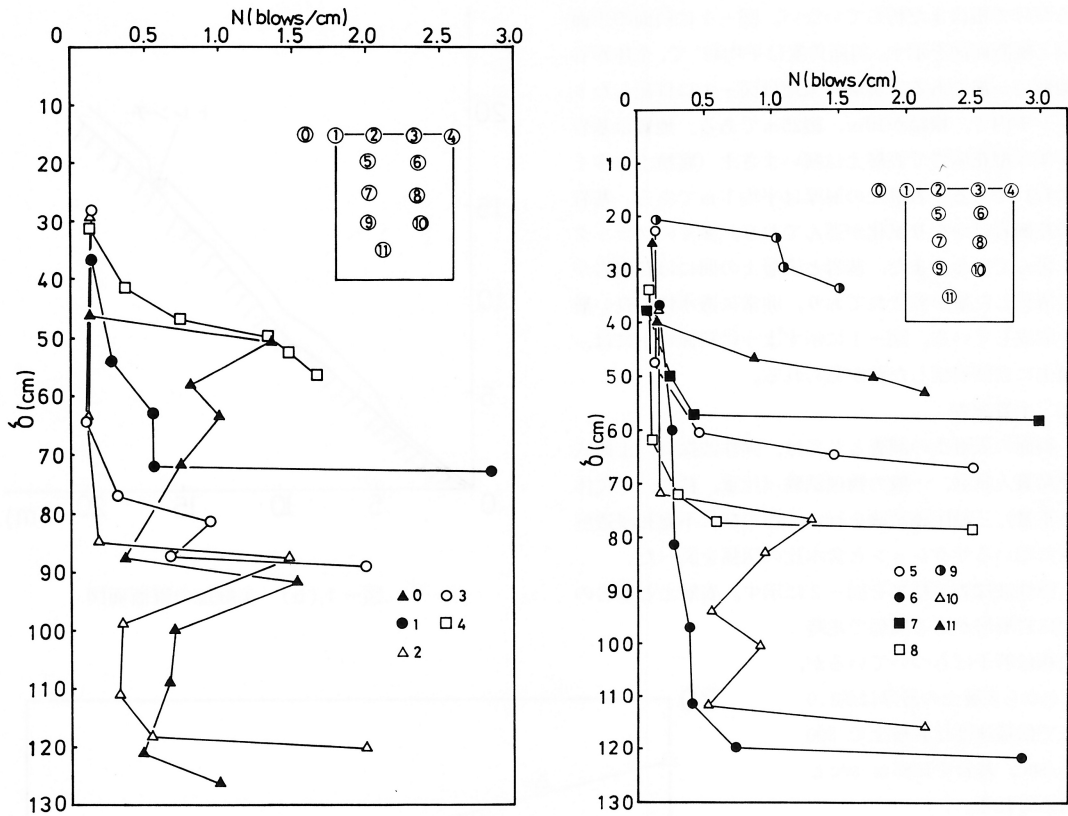


図-3 簡易貫入試験結果

は試料を飽和させ、圧密排水条件で行った。軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ (ϵ_a)、それと体積変化 ($\Delta v/v$) の関係を図-5に、また、破壊線を図-6に示す。これから、粘着力 c_d は0、内部摩擦角 ϕ_d は 31.4° と求まる。

図-7にサクシオンと体積含水率の関係を示す。試験は乱した試料を不かく乱試料と同一間隙比 ($e=0.8$) に締め固め、土柱法により湿潤過程および乾燥過程で測定したものである。

(3) 実験装置、実験方法

降雨装置としては、消防ポンプと $\phi 50\text{mm}$ の塩ビパイプを用いた。塩ビパイプには $\phi 2\text{mm}$ の穴を無数にあげ、上向きに水を噴出させることにより霧状で降雨させた。降雨強度は $20 \sim 30\text{mm/h}$ である。水は溪流を一部せき止めて使用した。

計測は間隙水圧、地表変位、地中ひずみ、それと雨量について行った。間隙水圧計は図-8に示すひずみゲージ式のものを試作した。測定精度は 1gf/cm^2 であり、2~3日間の使用ではゼロ点の変動はほとんどみられない。地表

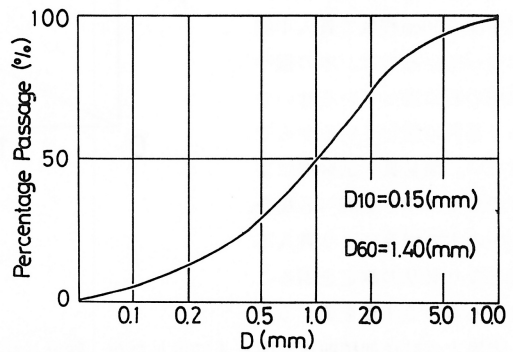


図-4 粒径加積曲線

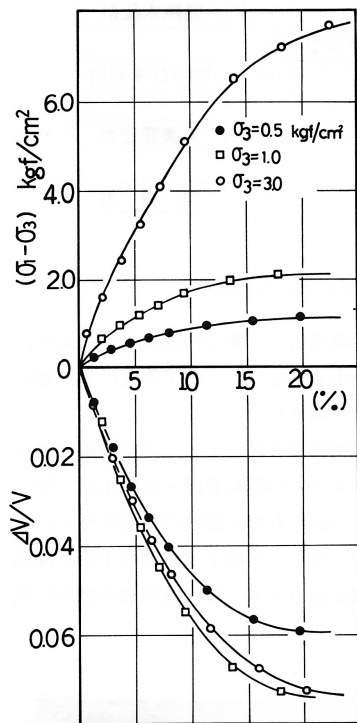


図-5 軸差応力, 軸ひずみ, 体積変化の関係

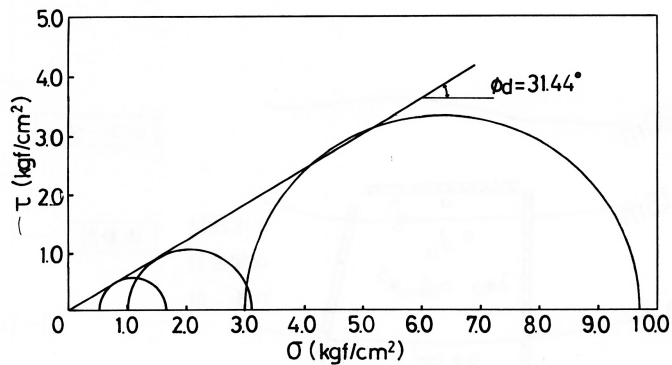


図-6 破壊線

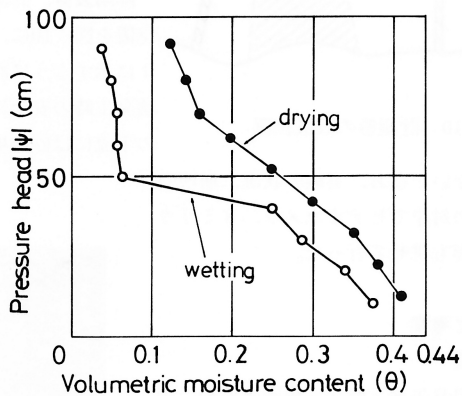


図-7 サクションと体積含水率の関係

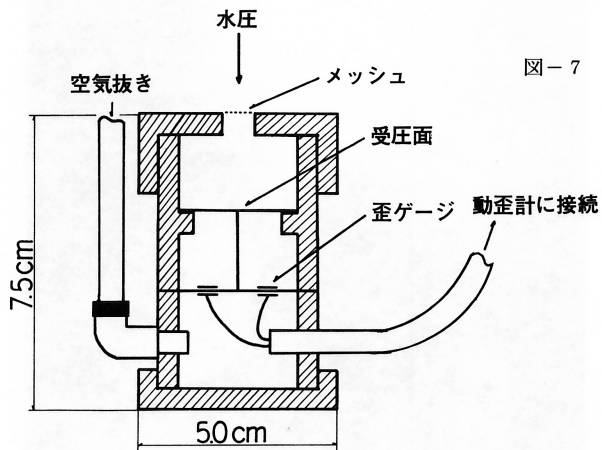


図-8 間隙水圧計

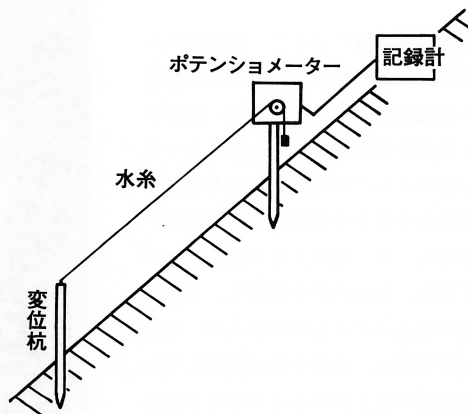


図-9 地表変位計

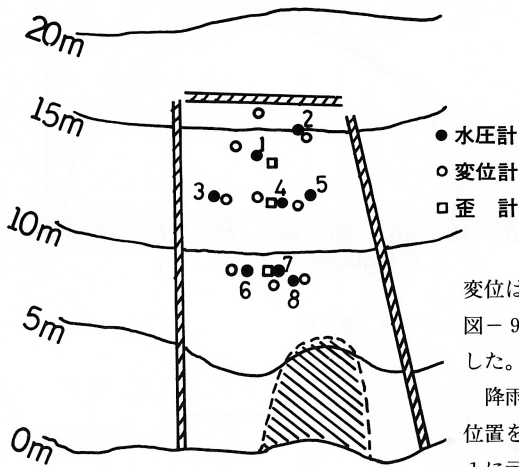


図-10 計測器の設置位置

出することはない。なお、実験の状況、崩壊の様子を映すため対岸でビデオカメラ、8ミリカメラによる撮影も併せて行った。

3. 実験結果と考察

(1) 崩壊の概要

1983年7月21日午後2時から降雨を始め、消防ポンプのトラブルによる中断を何度かはさんで、その日に3時間の降雨を与え、その後約13時間放置したのち、翌日約3時間の降雨を与えた時点で図-1(a)に示すように、自然崩壊跡の上部の斜面の一部が崩壊した。崩壊面積は約15㎡、土量は約20㎡である。写真-1に崩壊の状況を示す。

崩壊の様相は目視観察によると、引張りキレットが一気に広がり10cm程度になった時、基岩に沿って瞬時に土塊が斜面をすべり落ち、約10mの沢を横切って対岸の斜面を約2mほど上って停止した。引張りキレットが観察されて土塊が崩壊し、対岸で停止するまでに要した時間はせいぜい10秒程度であった。崩壊した土塊は10mの斜面をすべり落ち、10mの沢を横切り、さらに対岸斜面を約2m上ったにもかかわらず、かなり原状をとどめており、崩壊土塊に設置していた地表変位測定用の杭も倒れることなく土塊とともに移動していた。これは、崩壊中の土塊のすべり面付近の土は完全な液体状を呈しており、

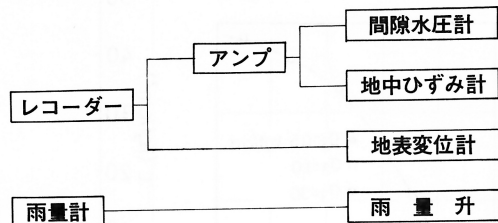


図-11 計測システムの概略

変位はポテンショメータにより測定した。測定精度は1mmである。図-9に地表変位計を示す。地中変位はパイプひずみ計により測定した。また、雨量は雨量升により測定した。

降雨装置、計測装置の全体の配置図を図-1に、計測機器の埋設位置を図-10に、それと計測システムの概略を図-11に示す。図-1に示すように計測は実験予定斜面から10m離れた場所で行い、崩壊発生時の安全には気を配った。また、実験予定斜面の下端の溪流の下流には砂防堤があり、崩壊が起っても土砂は演習林の域外に流



写真-1 崩壊の状況

このすべりにもとない液状化した層の上に乗って崩壊土塊がすべり落ちたためであろう。

この崩壊発生後も降雨は続けられたが、ごく小規模の崩壊が起ったのみで、対象斜面全域の崩壊は生じなかった。この理由としては、①直径50~60cmにも及ぶ伐採されたスギ、雑木の根の影響、②基岩と表層土の境界部にみられた透水性の良い岩屑層の影響等があげられる。実際、崩壊土塊より上方の斜面は崩壊時に約1cmの地表変位が観測されたが、崩壊土塊の上縁にみられた大きな2個の切株に止められて崩壊には至らなかったものと思われる。また、崩壊後の岩屑層の露出部からは降雨時に多量の湧水がみられた。

(2) 計測結果と考察

間隙水圧の経時変化を図-12に、地表変位、地中ひずみの経時変化を図-13に示す。地表変位はNo.2, 5, 8について、また、地中ひずみはNo.7について崩壊直前と崩壊時の測定結果を示した。これ以外の測点では崩壊前、崩壊時、崩壊後にわたって変位、ひずみの変化は全くみられなかったので示していない。

まず、間隙水圧の経時変化をみる。1日目と2日目を比べてみると、1日目はなだらかに微増しポンプのトラブ

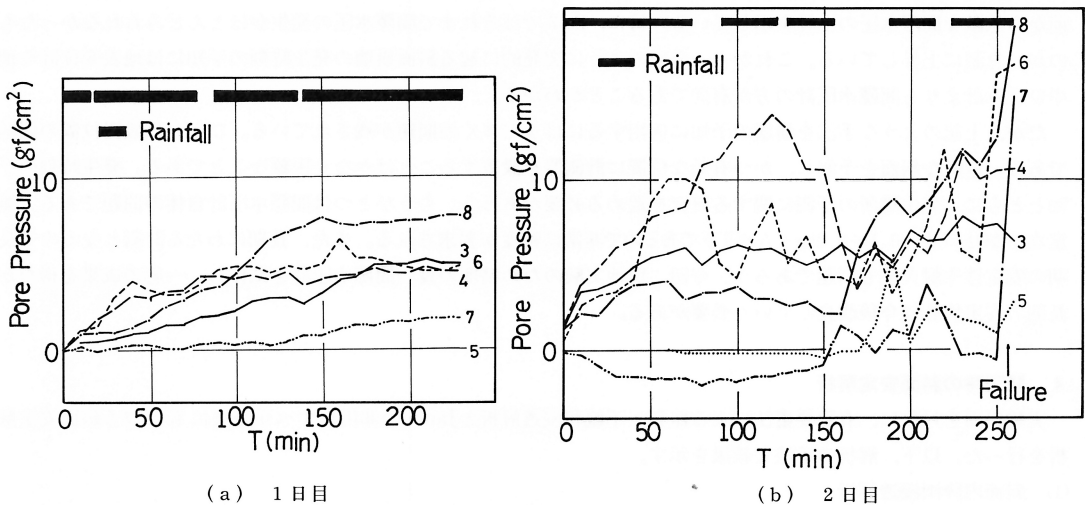


図-12 間隙水圧の経時変化

ルによる降雨の中断にもほとんど反応していないのに対し、2日目になると降雨開始後1時間程度で間隙水圧はかなり上昇し始め、降雨の中断にも敏感に反応している。この相違の原因として、1日目の降雨開始前の地中の飽和度が、場所によるばらつきはあるけれども50~60%程度とかなりな不飽和の状態にあったのに対し、2日目では前日の降雨により飽和度が80%以上に上昇していたことが考えられる。1日目に間隙水圧がなだらかな微増あるいは定常状態にあり、降雨の中断にも敏感に反応しないのは、浸潤前線がまだ基岩まで達しておらず地下水面が形成されていないからであろう。すなわち、浸潤前線が降下していく時、基岩と浸潤前線の間に間隙空気が閉塞されるが、間隙水圧計は基岩近くの深さに埋設されているので、計測された

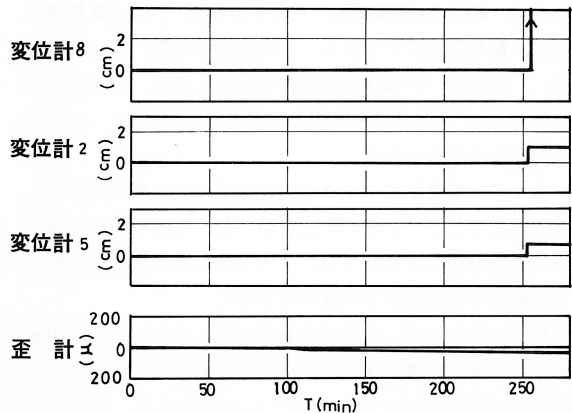


図-13 地表変位、地中ひずみの経時変化

データは間隙空気の閉塞に伴う圧力であろう。また、2日目は地中の飽和度が前日の降雨により高くなっており、降雨開始後短時間で浸潤前線は基岩に達して、地下の自由水面が形成され斜面内に飽和浸透流が生じ、間隙水圧計は斜面内の間隙水圧を測定していると思われる。斜面内に飽和浸透流が発生していることは、2日目になって1日目にはまるでみられなかった、斜面下部での浸透流の湧き出しがみられたことから明らかである。

斜面崩壊の発生時期を予測することは、災害から人命を守るためにきわめて重要なことである。崩壊発生までの地中ひずみ、地表変位、それに間隙水圧の計測データから崩壊時刻の予知の可能性を考えてみる。まず、地中ひずみであるが、図-13に示すように感度を上げているせいもあって若干の変動はみられるが、予知に使えるような目立った変化はしていない。また、地表変位は崩壊土塊に設置されたNo.8にみられるように崩壊の発生とともに一気に大変位が測定されているが、地表変位計の分解能は1mm程度あるにもかかわらず崩壊の前兆現象としての地盤の微小変位は測定されていない。崩壊土塊よりも上方に設置された地表変位計(No.2, 5)でも崩壊時に約1cmの急激な変位を測定しているのみで、やはり前兆現象としての微小変位は測定されていない。これから、今回のような崩壊では地表変位も予知に適していないことがわかる。もっとも面白い現象を示しているのが、崩壊土塊内及びその側方に設置された間隙水圧計(No.6, 7, 8)の測定データである。これらは、いずれも崩壊発生時刻の10~20分前から急激な間隙水圧の上昇を示している。特に、No.7ではそれまで間隙水圧の発生がほとんどみられなかったものが、急激に上昇している。これから、今回のように突発的に起る斜面崩壊の発生時刻の予知には地表変位計や地中ひずみ計よりも間隙水圧計の方が有効であることがわかる。

だが、上記のような手法を崩壊の予知に適用するにはまだ多くの問題が残されている。ひとつは設置位置の問題である。危険な斜面を予測し、かつ有効な位置に計測器を設置することはかなり困難なことである。発生時刻の予知とともに、発生場所の予測に関する研究を進める必要があろう。もうひとつは間隙水圧計自体の問題である。測定水圧がせいぜい0.1~0.2kgf/cm²以下であるので非常に精度が要求される。また、長期にわたる計測となるので長期の安定性や耐久性も問題であろう。今回、現地実験のため精度の良い間隙水圧計を試作し、一応の成果を得たが、長期の安定性等は今後改良していく必要がある。

4. 降雨時の斜面安定解析

実験斜面を対象に、有限要素法による飽和・不飽和浸透解析とJanbuの非円形すべり面法にもとづく斜面安定解析を行った。以下、解析の手法と結果を示す。

(1) 斜面内降雨浸透解析

飽和・不飽和領域の浸透を支配する基礎方程式は、連続の式とDarcyの法則を不飽和領域に拡張することにより、次の非線型方程式で表わされる⁹⁾

$$\text{div } K(\theta) \nabla (\phi + Z) = (C(\theta) + \alpha S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $K(\theta)$ は透水係数、 ϕ は圧力水頭、 α は不飽和領域で0、飽和領域で1である。 S_s は比貯留係数、 Z は鉛直座標、 t は時間、 θ は体積含水率である。また、 $C(\theta)$ は比水分容量($\partial \theta / \partial \phi$)で不飽和土の浸透特性曲線($\phi \sim \theta$ 曲線)の勾配から求められる。

式(1)の有限要素法による定式化は重みつき残差法で行い、重み関数としてはGalerkin法を用いた。時間項の取り扱いには後退差分法により行った。この手法の妥当性は室内模型実験結果との比較により確かである⁶⁾。

解析にあたって、浸透特性曲線は図-7に示した実測値を用い、不飽和透水係数は標準的な曲線にならぬ仮定した。飽和透水係数は実測で 0.2×10^{-2} cm/secである。基岩は不透水と仮定し、また、岩層層の透水係数の測定は困難であったので、この層の透水係数は表層土のそれと同じである

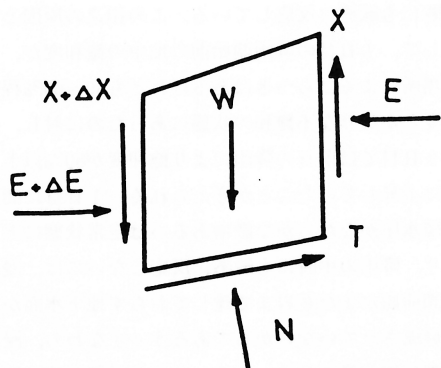


図-14 分割片に働く力

として解析した。従って、解析値は実測値よりも大きい間隙水圧となるであろう。斜面先は排水条件で解析を行った。

(2) 斜面安定解析

図-14に示すように、スライス側面に水平力E、鉛直方向せん断力Xを考え土塊全体として、 $\sum \Delta X = 0$ 、 $\sum \Delta E = 0$ を満足するとし、それぞれのスライスについての水平方向および鉛直方向の力の釣り合いの条件と $\Delta X = 0$ の仮定から簡易Janbu法は次式で示される¹⁰⁾。

$$F_s = \frac{1}{\sum W \cdot \tan a} \times \sum \frac{F_s \cdot (c' - u + W/b)(1 + \tan^2 a) \tan \phi'}{F_s + \tan a \cdot \tan \phi'} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 F_s は安全率、 W は土の重量、 a はスライス底辺と水平方向のなす角、 b はスライスの幅、 u は間隙水圧、 c' は粘着力、 ϕ' は内部摩擦角である。

安定解析にあたって、式(2)で両辺に F_s が存在するため初期値として $F_s = 1.0$ を入力し、出力値を入力しなおすことを繰り返し、入力値と出力値の差が0.01以内の値を F_s として求めた。その際、多変数関数極小化の技法を用いて最小安全率を求めた。斜面内間隙圧、土の自重の変化は浸透解析の結果を用いた。強度定数は三軸試験結果より $c' = 0$ 、 $\phi' = 31.44^\circ$ を用いた。

崩壊部分についての解析結果を図-15に示す。図中、濃い実線は自由水面を、1点鎖線は最小安全率0.7249を与えたすべり面を表している。この崩壊部分は斜面先が完全な排水条件となっているため、斜面先での大きな間隙水圧の発生はみられない。実際斜面の不均一性を考慮すれば、間隙水圧、すべり面、安全率等の計算値は実測値を十分説明するものと考えられる。なお、粘着力を0として安定解析を行ったが、実際持つであろうわずかの粘着力でも結果に与える影響は大きい。

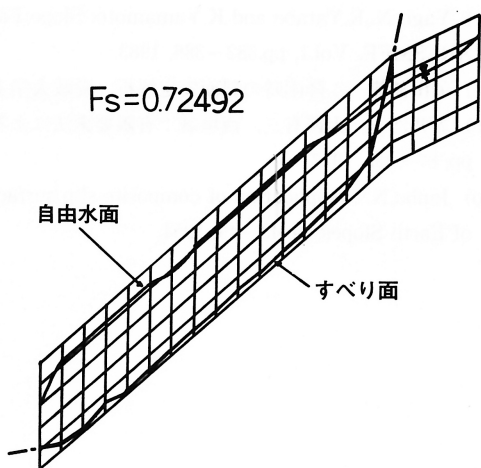


図-15 解析結果

あ と が き

降雨時の斜面崩壊の発生時刻の予知法の開発を主眼として、現地で斜面崩壊実験を行った。得られた結論は次のようである。

- 1) 本実験のように突発的に起る斜面崩壊では、地表変位、地中ひずみに前兆としての微小な変動は実用上測定不能な程度しか生じない。それに対し、間隙水圧は崩壊発生の10~20分前から急激な上昇を示しており、間隙水圧を測定することにより崩壊発生時刻を予知できる可能性がある。
- 2) 降雨装置やトレンチ掘削なども含めた本実験の方法が十分実用に供しうる。
- 3) 浸透水圧を考慮した安定解析が、降雨時の実斜面の安定解析にも適用可能である。

本研究を行うにあたり、消防ポンプは農学部附属演習林より貸して頂き、また、演習林事務所のスタッフ諸氏には実験用地の選定などで多大な御協力を頂いた。水圧計、変位計、ひずみ計の設計、製作は本学工学部海洋工学科技官、二神治氏と森正光氏による。実験を行うにあたり、海洋資源工学講座の学生諸氏の協力を得た。記して感謝の意を表します。

本研究の一部は昭和58年度科研費（自然災害特別研究、代表者網干教授）を使用した。また、計算は愛媛大学情報処理センターのFacomM-180II A Dによった。

引用文献

- 1) 小橋澄治：斜面安定，鹿島出版会，pp.18～58，1975。
- 2) 齋藤迪孝：斜面崩壊発生時期の予知に関する研究，鉄研報告，No.706，1970。
- 3) 森野亮宏，飯島啓之助：斜面崩壊検知に関する実験的研究，鉄道土木，No.17-6，1975。
- 4) 渡正亮，板垣治：微少音による岩盤地すべりの予知手法の予備実験，土木技術資料，No.17-2，1975。
- 5) 矢田部龍一，八木則男，榎明潔：不かく乱まさ土の強度特性と斜面安定解析，切土のり面および斜面の風化と安定に関するシンポジウム発表論文集，pp.43～50，1985。
- 6) 八木則男，矢田部龍一，山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，第330号，pp.107～114，1983。
- 7) Yagi, N., R. Yatabe and K. Yamamoto: Slope Failure Mechanism due to Seepage of Rain Water, Proc. 7th ARCSMFE, Vol.1, pp.382～386, 1983.
- 8) 矢田部龍一：降雨時の斜面安定解析，愛媛大学工学部紀要，Vol.X-3，1985。
- 9) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第264号，pp.87～96，1977。
- 10) Janbu, N. : Application of composite slip surfaces for stability analysis, Proc. European Conf. on Stability of Earth Slopes, pp.43～49, 1954.

(1984年9月29日受理)